

张浪平、尹祥础、梁乃刚, 2006, 加卸载响应比在伊朗地区地震活动性研究中的应用, 中国地震 22(4), 356 ~ 363。

加卸载响应比在伊朗地区地震活动性研究中的应用

张浪平¹⁾ 尹祥础^{1,2)} 梁乃刚¹⁾

1) 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京北四环西路 15 号 100080

2) 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

摘要 本文应用加卸载响应比理论, 分别对 2005 年 2 月 22 日伊朗东南部克尔曼省扎兰德 $M_s 6.4$ 地震和 2006 年 3 月 31 日伊朗西部洛雷斯坦省 $M_s 6.1$ 地震 2 个震例进行了时程曲线分析; 并用加卸载响应比方法对伊朗地区进行了时空扫描。通过考察加卸载响应比异常区域的演化过程, 对该地区未来的地震活动性进行了研究。

关键词: 加卸载响应比 (LURR) 时空扫描 伊朗地区 地震活动性

[文章编号] 1001-4683(2006)04-0356-08

[中图分类号] P315

[文献标识码] A

0 引言

地震的孕育过程是极其复杂的, 但从力学角度看, 其物理实质在于震源区介质的损伤、失稳和破坏。尹祥础在地震力学、损伤力学、非线性科学等学科的基础上提出了加卸载响应比理论 (LURR)。该理论不仅可以应用于地震预测, 还可应用于预测其它的地质灾害 (滑坡、矿震、岩爆、水库地震等)。经过多年的地震预测实践, 加卸载响应比理论得到了比较广泛的研究和应用, 并不断取得新的进展。应用加卸载响应比作为地震前兆判定指标, 对上百例地震资料进行检验, 80% 以上的检验效果良好 (尹祥础等, 1991; Yin, et al., 1994, 2000; 宋治平等, 1996)。对 2004 年中国大陆地区发生的 $M_s 5.0$ 地震, 除资料不全不能计算加卸载响应比的地区外, 88% 的地震都发生在高加卸载响应比的地区 (尹祥础等, 2004); 2005 年中国大陆地区发生的 $M_s 5.0$ 地震共 13 个, 其中 12 个发生在高加卸载响应比的地区 (尹祥础等, 2005)。

伊朗地区地处欧亚地震带, 是一个地震频发的地区。在构造上, 伊朗板块位于北部相对稳定的欧亚板块和南部向北推挤的阿拉伯板块之间, 其地壳变形就是因阿拉伯板块自新生代时期起向北推挤造成的, 故该区地震多分布于该板块边缘 (Berberian, et al., 1979; Jackson, et al., 1979) (图 1)。伊朗地区地震频繁, 自 2000 年 1 月 1 日至 2006 年 4 月 14 日, 该地区共

[收稿日期] 2006-04-18; [修定日期] 2006-12-20。

[项目类别] 国家自然科学基金委员会 (项目编号: No. 10232050, No. 10572140) 与国家 973 项目 2002CB412706 资助。

[作者简介] 张浪平, 男, 1982 年生, 中国科学院力学研究所在读博士生, 主要从事地震力学、地震预测等研究工作。

E-mail: zhanglp @nm. imech. ac. cn。

发生了 M_s 6.0 地震 8 次。其中 2003 年 12 月 26 日凌晨发生在伊朗东南部克尔曼省巴姆古城西南的 M_s 6.8 地震造成了 3 万多人的死亡和 85 % 建筑的倒塌,使著名的巴姆古城在瞬间变为废墟;2005 年 2 月 22 日伊朗东南部克尔曼省的扎兰德 M_s 6.4 地震(震中为 $N30.75^\circ$ 、 $E56.81^\circ$),造成至少 500 人死亡,5000 多人受伤;2006 年 3 月 31 日 9 时 17 分在伊朗西部洛雷斯坦省发生的 M_s 6.1 地震(震中为 $N33.62^\circ$ 、 $E48.91^\circ$),到 2006 年 4 月 1 日为止,已有至少 66 人死亡,近 1200 人受伤。在本文中,我们将对后 2 个地震进行加卸载响应比时程曲线分析,并对伊朗地区进行加卸载响应比的时空扫描,以进一步考察该地区的地震活动趋势。

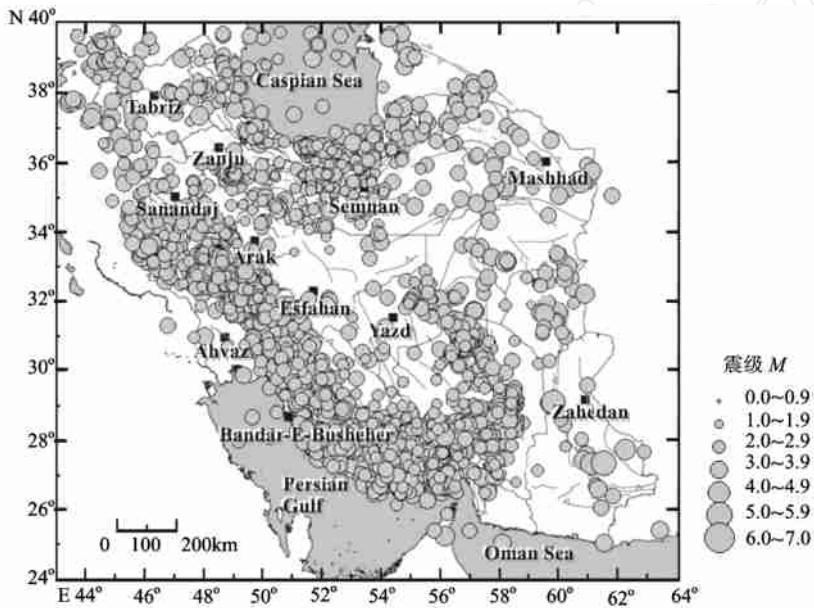


图 1 伊朗地区 2000 年 1 月至 2006 年 4 月地震震中分布图

Ahvaz:阿瓦士;Arak:阿拉克;Bandar-E-Busheher:布什尔;Caspian Sea:里海;Esfahan:伊斯法罕;Mashhad:马什哈德;Oman Sea:阿曼湾;Persian Gulf:波斯湾;Tabriz:大不里士;Sanandaj:萨南达季;Semnan:塞姆南;Yazd:亚兹德;Zahedan:扎黑丹;Zanjan:赞詹

1 加卸载响应比(LURR)的介绍

加卸载响应比理论的主要思路是:孕震系统对加载响应与卸载响应的比值 Y 能够定量地刻画孕震区介质的损伤程度或反映该系统趋近失稳程度,可以将其定义为(尹祥础,1987;尹祥础等,1991)

$$Y = \frac{X_+}{X_-} \tag{1}$$

式中正号表示加载阶段的响应率,负号表示卸载阶段的响应率。取不同的物理量作响应, X 的表达式不同。取地震能量作为响应,加卸载响应比 Y 定义为

$$Y_m = \frac{\left(\begin{matrix} N^+ \\ E_i^m \\ i=1 \end{matrix} \right)_+}{\left(\begin{matrix} N^- \\ E_i^m \\ i=1 \end{matrix} \right)_-} \quad (2)$$

式中 E 为地震的能量,“+”代表加载,“-”代表卸载。 m 可以取为 0、1/3、1/2、2/3 或 1。当 $m=1$ 时, E^m 表示能量;当 m 为 1/3 或 2/3 时, E^m 表示孕震区域的线性尺度和面尺度;当 $m=1/2$ 时, E^m 表示 Benioff 应变;当 $m=0$ 时, Y 值相当于 N^+/N^- , 而 N^+ 和 N^- 分别代表加载和卸载过程中出现的地震数量。在本文中, m 取为 1/2。

大量震例的研究表明,在地震平静期,加卸载响应比在 1 附近波动,而在大地震前夕,加卸载响应比明显升高至远大于 1,在最高值开始回落之后,大地震随之发生。

2 2 个震例的时程曲线分析

2.1 震例 1——扎兰德 $M_s 6.4$ 地震

我们得到的伊朗地区 2003 年以前的地震目录其震级下限太高,地震目录数量少,所以我们选取了近来发生的 2 个震级 6.0 级以上的震例进行时程曲线分析。首先对 2005 年 2 月 22 日伊朗东南部克尔曼省扎兰德 $M_s 6.4$ 地震 ($N30.75^\circ$, $E56.81^\circ$) 进行时程曲线分析。计算参数为:时间范围 2003 年 1 月 1 日~2006 年 3 月 31 日,时间窗 360 天,滑动时间步长 30 天,取圆形计算区域,半径 $R=300\text{km}$ 。震源机制解中走向为 298° 、倾向为 37° 、倾角为 176° 、深度为 24.4km 、摩擦系数为 0.4,震级范围 0~5.0。计算结果示于图 2。从图 2 中可以看出,在地震发生前大约 1 个月的时候,加卸载响应比达到峰值;从图 2 中还可以看出加卸载响应比从 2006 年 2 月开始继续升高,这表明该计算区域未来仍有较高的地震活动性。

要说明的是,根据不同震级与空间尺度(圆形区域半径 R) 之间的关系(Yin, et al., 2002; 2003),一般 R 取 250km 比较适宜。但是在该计算区

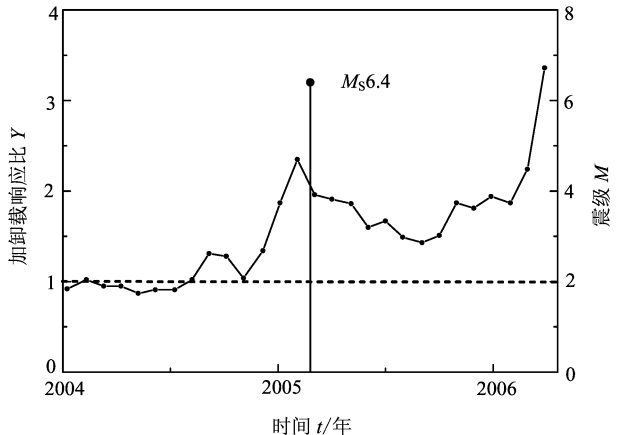


图 2 震例 1 的加卸载响应比时程曲线

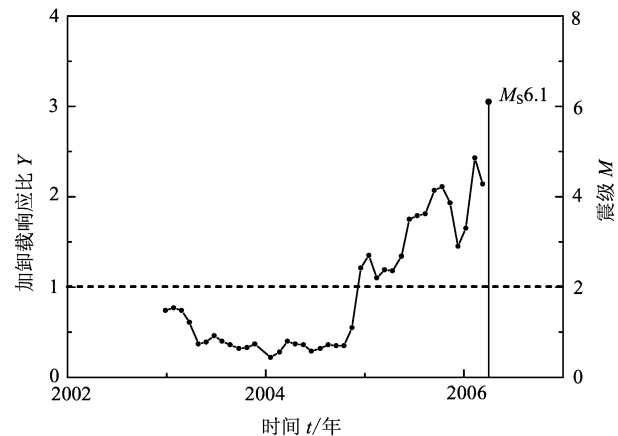


图 3 震例 2 的加卸载响应比时程曲线

域内,地震目录数量偏少,没有达到区域内地震个数大于或等于 20 的计算标准而不能进行计算,故将半径扩大到 300km。

2.2 震例 2 ——洛雷斯坦 $M_s 6.1$ 地震

对该地震进行程曲线分析的计算参数为:时间范围 2002 年 1 月 1 日~2006 年 3 月 31 日,时间窗 360 天,滑移时间步长 30 天,取圆形计算区域半径 R 为 300km,震源机制解中走向为 222° ,倾向为 84° ,倾角为 103° ,深度为 15km,摩擦系数为 0.4,震级范围 0~5.0。计算结果如图 3。由图 3 可见,在 2005 年 9 月和 2006 年 1 月左右加卸载响应比两次达到峰值,然后在 2006 年 3 月 31 日发生了该地震。

以上 2 个震例都是在加卸载响应比达到峰值后的一段时间内发生了地震,这可与我们在中国大陆和日本、美国等地的结果互相印证(尹祥础等,1996;张晖辉等,2005)。

3 伊朗地区 LURR 时空扫描

将伊朗地区按照 $2^\circ \times 2^\circ$ 进行区域划分,其划分出的网格见图 4。首先根据每个网格内发生的主要强震的震源机制解确定出该网格的主断层参数,再根据日、月引潮力所引起的库仑应力的变化判断出每个地震是处于加载阶段还是卸载阶段。在每一个固定的计算时间窗内,根据加卸载响应比的空间尺度(半径为 R 的圆形区域)以一定的滑动步长进行加卸载响应比的空间扫描。在进行空间扫描时,选取半径为 R 的圆形区域为空间窗,首先将纬度固定,再沿着经度方向扫描,针对每一个空间点,计算该圆形区域内加卸载响应比的值,然后再沿纬度方向扫描。本文所用的空间扫描步长为 0.25° ,取震级范围为 0~4.0 级, $R=200\text{km}$ 。图 5(a) 是 2004 年加卸载响应比异常区域分布图,且标出了次年(2005 年)全年发生的 M_s 5.0 地震;图 5(b) 是相应时间段用加卸载响应比方法能计算出响应比值的区域,称为可计算区域。图 5(c) 是 2005 年加卸载响应比异常区域分布图,且标出了 2006 年 1 月 1 日~2006

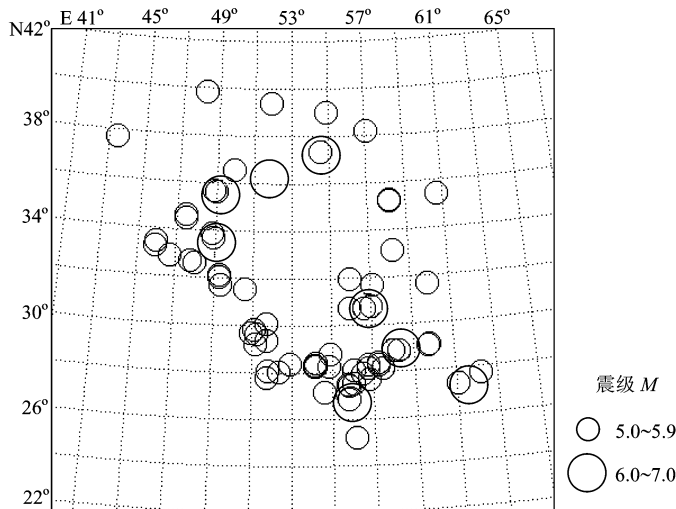


图 4 伊朗地区区域划分网格及 2000 年 1 月 1 日至 2006 年 3 月 31 日 5.0 级以上地震分布

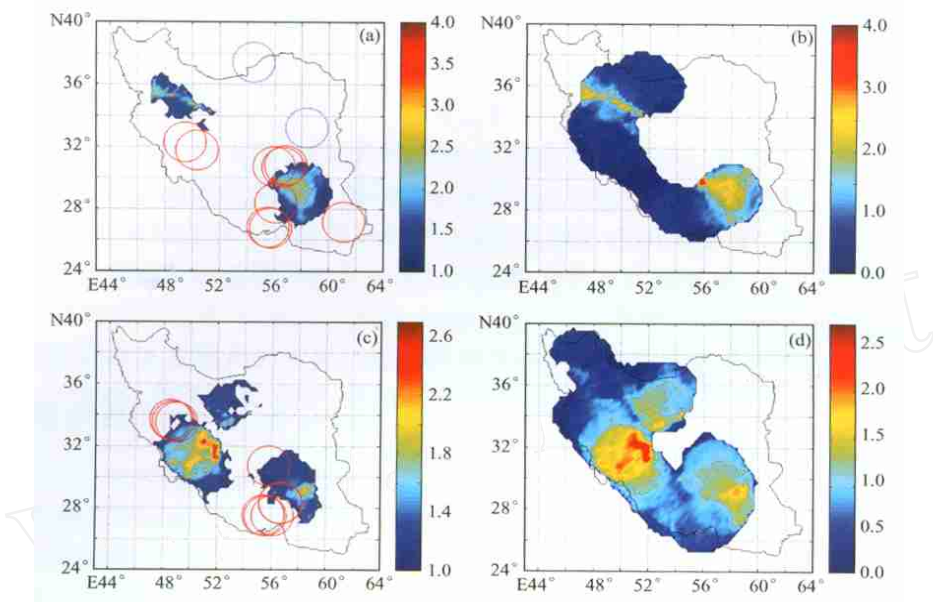


图 5 (a) 伊朗地区 2004 年加卸载响应比异常区域分布图, 同时标出了次年 (2005 年) 全年发生的 5 级以上地震; (b) 2004 年加卸载响应比可计算区域图; (c) 2005 年加卸载响应比异常区域分布图, 且标出了 2006 年 1 月 1 日 ~ 2006 年 4 月 6 日发生的 5 级以上地震; (d) 2005 年加卸载响应比可计算区域图
红色实线圆圈表示发生在加卸载响应比异常区域内 5 级以上地震; 蓝色虚线圆圈表示发生在加卸载响应比不可计算区域内的 5 级以上地震; 色标表示加卸载响应比 γ 值的大小

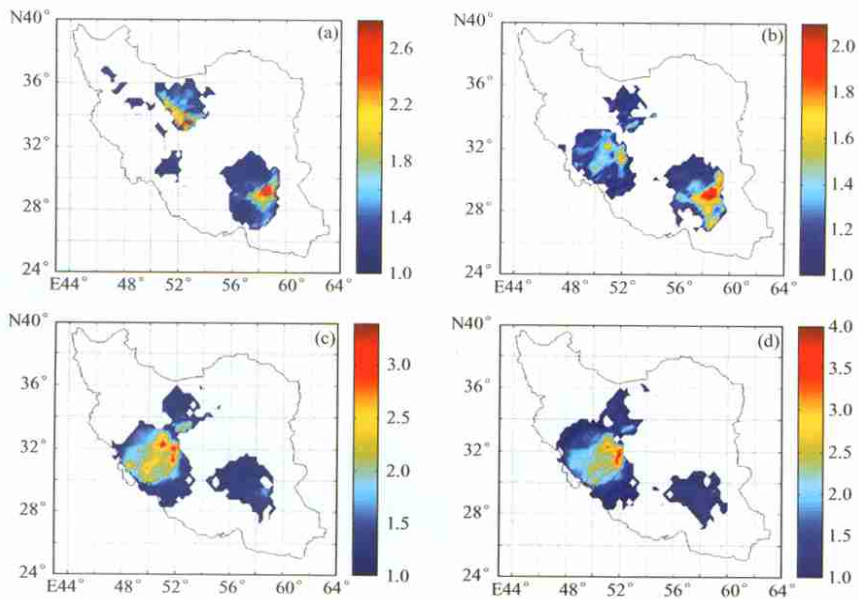


图 6 伊朗地区加卸载响应比异常区域发展演化过程, 扫描步长为 0.25° , 半径 $R = 200\text{km}$ 。(a) 2004 年 10 月 1 日 ~ 2005 年 9 月 30 日异常区域图; (b) 2004 年 12 月 1 日 ~ 2005 年 11 月 30 日异常区域图; (c) 2005 年 2 月 1 日 ~ 2006 年 1 月 31 日异常区域图; (d) 2005 年 4 月 1 日 ~ 2006 年 3 月 31 日异常区域图。色标表示加卸载响应比 γ 值的大小

年 4 月 6 日发生的 M_s 5.0 地震;图 5(d)为相应的可计算区域。由图 5 可以看出,在加卸载响应比异常区内,次年发生中强度地震的概率很大。2005 年发生了 11 个 5.0 级以上的地震,其中 8 个地震发生在加卸载响应比可计算区域,且全部发生在加卸载响应比异常区内。到 2006 年 4 月 6 日为止,已经发生 5.0 级以上地震 8 个,这 8 个地震均发生在加卸载响应比异常区域。我们还分别使用 $R = 150\text{km}$ 和 $R = 200\text{km}$ 两个半径进行了空间扫描,且分别对 2004、2005、2006 年发生的地震与其前 1 年的扫描结果进行了对照统计,结果列于表 1。统计结果表明加卸载响应比方法的预测效果甚好。

表 1 用 $R = 150\text{km}$, $R = 200\text{km}$ 进行时空扫描的预测结果统计

时间 (年-月-日-时-分-秒)	纬度 (°)	经度 (°)	震级	深度 (km)	半径 $R = 150\text{km}$		半径 $R = 200\text{km}$	
					预测效果	最小距离 (km)	预测效果	最小距离 (km)
2006-03-25-07-03-54	27.52	55.77	5.4	14	yes	110.32	yes	81.27
2006-03-25-09-03-14	27.54	56.01	5.1	15	yes	89.06	yes	79.03
2006-03-25-10-03-36	27.47	55.8	5	15	yes	110.62	yes	86.95
2006-02-28-07-02-03	28.18	56.76	5.9	18	yes	20.06	yes	35.63
2006-02-18-11-02-31	30.75	55.89	5	14	yes	10.52	yes	10.52
2006-03-30-19-03-16	33.7	48.86	5.1	14	yes	51.12	yes	11.6
2006-03-31-01-03-02	33.62	48.91	6.1	14	yes	42.02	yes	16.7
2006-03-31-11-03-02	33.89	48.79	5.3	14	yes	71.33	yes	16.01
2005-11-27-10-11-19	26.86	55.83	6.2	10	yes	119.17	yes	60.14
2005-11-27-16-11-38	26.88	55.78	5.9	15	yes	120.19	yes	62.17
2005-03-13-03-03-27	27.32	61.54	6.2	55	scarcity	225.96	yes	183.02
2005-12-27-21-12-14	28.12	56.07	5.2	14	yes	22.16	yes	16.02
2005-10-20-23-10-19	31.59	50.56	5	18	yes	132.37	yes	157.94
2005-02-22-02-02-21	30.8	56.76	6.4	14	yes	77.16	yes	5.65
2005-05-01-18-05-38	30.8	57	5.1	14	yes	65.74	yes	5.56
2005-05-14-18-05-57	30.72	56.65	5.2	14	yes	77.77	yes	10.13
2005-12-26-23-12-50	32.15	49.23	5.2	18	yes	116.78	yes	170.69
2005-06-19-04-06-04	33.13	58.2	5.2	15	scarcity	292.73	scarcity	237.1
2005-01-10-18-01-25	37.38	54.58	5.6	15	scarcity	399.43	scarcity	431.84
2004-01-14-16-01-47	28.05	52.33	5.1	15	scarcity	460.35	scarcity	411.71
2004-10-06-11-10-27	28.9	57.99	5.2	15	yes	50.61	yes	16.72
2004-10-07-12-10-55	28.41	57.27	5	10	yes	10.21	yes	10.21
2004-10-14-02-10-42	31.73	57.11	5.1	16	scarcity	196.11	yes	115.21
2004-05-28-12-05-46	36.37	51.64	6.3	28	scarcity	893.59	scarcity	820.49
2004-10-07-21-10-15	37.35	54.56	6	15	scarcity	861.39	scarcity	782.4

注:预测效果栏中的 yes 表示该地震发生在加卸载响应比异常区域或其孕震区域内;scarcity 表示该地震发生在加卸载响应比不可计算区域。最小距离表示该地震震中位置离加卸载响应比异常数值点的最小距离,若最小距离小于等于扫描半径 R ,则说明该地震发生在异常区域或其孕震区域内。

为了进一步研究伊朗地区地震活动趋势,分别采用半径 R 为 100、150、200、300km,计算时间窗为 2005 年 4 月 1 日~2006 年 3 月 31 日,对该地区行了加卸载响应比的空间扫描。图 6(d) 给出了半径 $R=200\text{km}$ 的扫描结果,图 6(d) 中加卸载响应比异常区域为目前伊朗地区地震活动性较高的区域。

根据震例 1 的时程曲线图 2,发现伊朗东南部克尔曼省及周边地区的加卸载响应比值在 2005 年 2 月扎兰德地震以后仍然远大于 1,这意味着该区域在未来 1~2 年内仍将处于相当高的地震活动水平。为了更好地研究伊朗地区未来的地震活动趋势,我们还对该地区进行了不同时段加卸载响应比空间扫描,图 6(a)~(d) 给出了加卸载响应比异常区域的分布及发展演化过程(不同时段计算时间窗为 1 年,滑动步长为 2 个月)。在 29°N 、 58°E 附近的区域加卸载响应比的值随时间先涨后落,根据中强地震前加卸载响应比异常时间尺度与震级存在的关系(张晖辉等,2005;Yin, et al., 2006),未来将会在不同概率条件下发生震级为 M 地震的发震时间可按公式 $T=60(1-2.3\times 10^{-0.08}M)$ (单位:月)进行估计;另一个区域(32°N 、 51°E)附近加卸载响应比值正在升高,将对其进行跟踪扫描,待其达到加卸载响应比峰值后可按上述规律进行判断。

4 结语

本文对伊朗地区的 2 个震例进行了时程曲线分析,发现实际地震发生之前一段时间加卸载响应比均会达到峰值;同时对该地区进行了加卸载响应比时空扫描。对比加卸载响应比异常区域与随后 1 年的实际地震情况,加卸载响应比的预测效果令人满意,这也证明了加卸载响应比方法对不同构造条件的适应性。最后通过考察加卸载响应比的时空演化,对该地区未来地震活动趋势进行了研究。

致谢:本文的地震目录数据和图 1 来源于 Iranian National Seismic Network (INSN) 网站,震源机制解来源于哈佛大学的 CMT Catalog Search 网站。本文得到了 Shahpasandzadeh M., 中国科学院计算机网络信息中心超级计算中心迟学斌、陆忠华、程强、冯仰德、单桂华、徐薇、刘俊、牛铁等的帮助,在此表示感谢。

参考文献

- 宋治平、尹祥础、陈学忠,1996,加卸载响应比的时空演化特征及其对地震三要素的预测意义,地震学报,18(2),179~186。
- 尹祥础、尹灿,1991,非线性系统的失稳前兆与地震预测,中国科学,(5),512~518。
- 尹祥础、张晖辉、彭克银等,2004,多时空尺度加卸载响应比扫描预测 2005 年中国大陆地震趋势,中国地震趋势研究(2005 年度),285~292,北京:地震出版社。
- 尹祥础、张晖辉、张浪平等,2005,从加卸载响应比的变化预测中国大陆地震趋势,中国大陆强震趋势预测研究(2006 年度),92~96,北京:地震出版社。
- 尹祥础,1987,地震预测新途径的探索,中国地震,3(1),1~7。
- 尹祥础、宋治平,1996,关东等地区加卸载响应比的时间变化及其预测意义,中国地震,12(3),331~334。
- 张晖辉、尹祥础、梁乃刚等,2005,美国西部地区加卸载响应比的时空扫描及其地震趋势研究,地震,25(3),20~26。
- 张晖辉、尹祥础、梁乃刚,2005,中国大陆地区中强地震前加卸载响应比异常时间尺度的统计研究,中国地震,21(4),486~495。
- Berberian, M., Asudeh, I., Bilham, R. G., et al., 1979, Mechanism of the main shock and the aftershock study of the Tabas-Golshan (Iran) earthquake of September 16, 1978: A preliminary report, Bull. seism. Soc. Am., 69, 1851~1859.

- Jackson, J. A., Fitch, T. J., 1979, Seismotectonic implications of relocated aftershock sequences in Iran and Turkey, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **57**, 209 ~ 229.
- Yin Xiangchu, Chen Xuezhong, Song Zhiping, 1994, The load/unload response ratio (LURR) theory and its application to earthquake prediction, *Journal of Earthquake Prediction Research*, **3**(3), 325 ~ 333.
- Yin Xiangchu, Chen Xuezhong, Wang Yucang, et al, 2000, Development of a new approach to earthquake prediction: load/unload response ratio (LURR) theory, *Pure Appl. Geophys*, **157**(11 ~ 12), 2365 ~ 2383.
- Yin Xiangchu, Mora P, Peng Keyin, et al, 2002, Load-unload response ratio and accelerating moment/energy release critical region scaling and earthquake prediction, *Pure Appl. Geophys*, **159**(9), 2511 ~ 2523.
- Yin Xiangchu, Peng Keyin, Yu Huaizhong, et al, 2003, Scaling of LURR Critical Region, 3rd APEC Cooperation for Earthquake Simulation Workshop Proceedings, Edited by A. Donnellan and Peter Mora, Coprint, Brisbane, 359 ~ 364.
- Yin Xiangchu, Zhang Langping, Zhang Huihui, et al, 2006, LURR's Twenty Years and Its Perspective, *Pure Appl. Geophys*, **163**(11-12).

Application of Load/Unload Response Ratio in Study of Seismicity in the Region of Iran

Zhang Langping¹⁾ Yin Xiangchu^{1,2)} Liang Naigang¹⁾

1) State Key Laboratory for Non-linear Mechanics, Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080, China

2) Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

Abstract The variation of LURR against time for earthquakes in Kerman Province, Iran, on February 22, 2005, M_s 6.4 and in Lorestan Province, Iran, M_s 6.1 respectively, has been calculated. The tempo-spatial scanning of Load/Unload Response Ratio in the region of Iran during January 1, 2003 to March 31, 2006 has been conducted, with 1 year as time-window, 1 month as time-step, and the seismicity in this region is studied.

Key words: Load-Unload Response Ratio (LURR) Tempo-spatial scanning The region of Iran Seismicity